PERSAMAAN UNTUK MENGHITUNG KOEFISIEN PENURUNAN TEKANAN ALIRAN DUA FASE CAIR-GAS MELALUI ORIFICE

(Ir. Suheli , M.T.) *

Abstract

Calculation of local resistance gas-liquid two phase flow through orifice is a problem that engineering must answer. A new model in calculation technique have been developed, but the equation to calculate the local resistance coefficient to orifice isn't there yet. More over , the precision of calculation is needed in engineering plan.

The equation of local resistance coefficient to orifice is getting from the manipulation of energy and momentum equation gas-liquid two phase flow for separate flow.

The local resistance coefficient depends on mass quality (x), m parameter (ratio of orifice's hole section and orifice's section), void fraction (□) and position (z)

Keywords *:gas-liquid two-phase flow, orifice, local resistance coefficient .*

I. LATAR BELAKANG

Pengukuran kecepatan aliran bahan melalui pipa adalah sangat penting dalam industri, termasuk industri kimia, minyak, baja, makanan dan sebagainya. Salah satu alat untuk mengukur aliran fluida pada saluran adalah orifice.

Dalam aliran dua phase, orifice plate digunakan untuk menentukan (mengukur) kualitas massa gas bila kecepatan aliran massa total diberikan. Pengukuran kecepatan aliran tidak terlepas dari koefisien kerugian tekanan yang ada di dalam orifice. Sehingga

* **Ir. Suheli, M.T.** adalah Dosen Fakultas Teknik Universitas Tidar Magelang

perhitungan tahanan lokal dari cairan-gas dalam aliran dua phase melalui orifice merupakan persoalan yang harus segera dijawab dalam teknik perekayasaan.

Sekarang ini teknik pengukuran kecepatan aliran cairan-gas dalam aliran dua phase dengan orifice bertambah baik. Didalam pipa yang lurus aliran dua phase dengan suatu orifice, perhitungan tahanan orifice harus dilakukan sementara ketelitian perhitungan merupakan faktor yang penting di dalam menentukan perencanaan yang ekonomis dan dapat dipercaya.

Persamaan untuk menghitung koefisien tahanan lokal pada orifice untuk aliran dua fase cair gas tidak disediakan dalam literatur , sehingga perlu dicari persamaannya .

II. LANDASAN TEORI

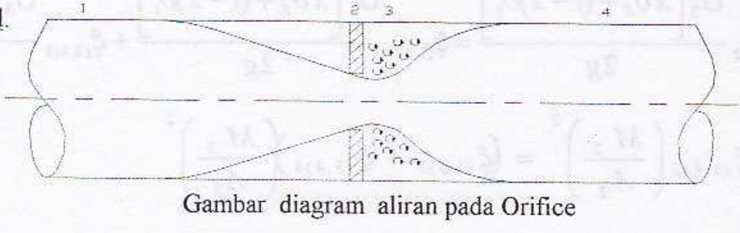
Persaman energi yang digunakan untuk menghitung Koefisien tahanan lokal diturunkan dari persamaan energi aliran dua fase untuk aliran terpisah (Gad Hetsroni, 1982) dan persamaan momentum untuk aliran dua fase untuk aliran terpisah (Graham B. Wallis, 1969)

Didalam saluran yang tertutup, fluida yang mengalir mengalami hambatan karena gesekannya terhadap dinding saluran. Untuk fluida yang incompressible (tak mampu mampat) kerugian/hambatan tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor antara lain kecepatan fluida, kekentalannya dan sebagainya.

Bila fluida dua phase dialirkan melalui suatu orifice maka di daerah tersebut akan terjadi rugi-rugi tahanan/hambatan lokal yang besarnya sangat dipengaruhi oleh kualitas massa fluida dua phase tersebut.

Kerugian tekanan yang terjadi di daerah tersebut (kerugian tahanan lokal) : $\Delta p1,4$ dibagi dua yaitu (lihat gambar di bawah) :

$\Delta p1,3$ (kerugian yang terjadi antara titik 1 dan 3) yaitu pada daerah yang terjadi kontraksi dan $\Delta p3,4$ (kerugian yang terjadi antara titik 3 dan 4) yaitu di daerah ekspansi tidak terkontrol.



Gambar diagram aliran pada Orifice

$$\Delta p_{1,4} = \Delta p_{1,3} + \Delta p_{3,4} \qquad (1)$$

$$\Delta p_{1,4} = \left(\xi_{1,4}\right)_2 \frac{G_2^2 \bar{\upsilon}}{2g} \qquad (2)$$

$$\Delta p_{1,3} = \left(\xi_{1,3}\right)_3 \frac{G_3^2 \bar{\upsilon}}{2g} \qquad (3)$$

$$\Delta p_{3,4} = \left(\xi_{3,4}\right)_3 \frac{G_3^2 \upsilon}{2g} \qquad (4)$$

$(\xi 1,4)2$ = koefisien kerugian tekanan dari penampang 1
sampai 4 berdasarkan massa yang mengalir pada
bidang 2.

Massa yang mengalir pada penampang 2 dan 3 adalah sama. Kecepatan massa yang mengalir (M) melewati orifice sama dengan fluks massa (G) tersebut dikalikan dengan penampang orifice (A)

M = G . A

Dianggap bahwa fluida yang mengalir adalah fluida incompressible dan volume spesifik campuran untuk suatu penampang diantara 1 - 4 adalah sama dengan volume spesifik rata-rata diantara penampang yang sama.

$$\bar{\upsilon} = x\bar{\upsilon}_g + (1-x)\upsilon_l \qquad (5)$$

Persamaan 2, 3, 4, dan 5 masuk ke persamaan 1 sehingga :

$$\xi_{(1,4)2} \frac{G_2^2\left[x\bar{\upsilon}_g + (1-x)\upsilon_l\right]}{2g} = \xi_{(1,3)3} \frac{G_3^2\left[x\bar{\upsilon}_g + (1-x)\upsilon_l\right]}{2g} + \xi_{(3,4)3} \frac{G_3^2\left[x\bar{\upsilon}_g + (1-x)\upsilon_l\right]}{2g}$$

$$\xi_{(1,4)2}\left(\frac{M_2}{A_2}\right)^2 = \left(\xi_{(1,3)3} + \xi_{(3,4)3}\right)\left(\frac{M_3}{A_3}\right)^2 \qquad (6)$$

Dengan menganggap fluida yang mengalir adalah incompressible, maka massa yang mengalir pada penampang 2 dan 3 adalah sama sehingga

$$\xi_{(1,4)2} = \left(\xi_{(1,3)3} + \xi_{(3,4)3}\right)\left(\frac{A_2}{A_3}\right)^2 \qquad (7)$$

III. PENURUNAN TEKANAN

Untuk memecahkan persoalan penurunan tekanan pada saluran untuk aliran dua phase dibutuhkan persamaan keseimbangan momentum campuran.

Untuk itu model yang paling sering digunakan untuk menghitung penurunan tekanan adalah model aliran terpisah.

Persamaan keseimbangan energi yang digunakan ialah(Gad Hetsroni, 1982):

$$\frac{1}{W}\left(\frac{dq_e}{dz} - \frac{dw}{dz}\right) = \frac{d}{dz}\left[xh_g + (1-x)h_l\right] + \frac{d}{dz}\left[x\frac{V_g^2}{2} + (1-x)\frac{V_l^2}{2}\right] + g\cos\theta \qquad (8)$$

dimana : Vg = kecepatan fase gas , Vl = kecepatan fase cair

Untuk aliran adiabatis tanpa gesekan saluran horisontal rumusnya menjadi :

$$-\frac{1}{W}\left(\frac{dw}{dz}\right) = \frac{d}{dz}\left[x\frac{V_g^2}{2} + (1-x)\frac{V_l^2}{2}\right] + g \qquad (9)$$

Bila diintegralkan dari 1 - 3 dan digabungkan dengan persamaan (3) maka didapatkan :

$$\left(p_1\upsilon + \frac{G_1^2}{2g}K\right) - \left(p_3\upsilon + \frac{G_3^2}{2g}K\right) - (z_3 - z_1) = \xi_{(1,3)3}\frac{\upsilon^2 G_3^2}{2g} \qquad (10)$$

dimana

$$K = \frac{\upsilon_g^2 x^3}{\alpha^2} + \frac{\upsilon_l^2(1-x)^3}{(1-\alpha)^2} \qquad (11)$$

Dari persamaan-persamaan 10 dan 11, kemudian diambil tahanan lokal untuk daerah kontraksi yang tiba-tiba (ξ (1, 3))3

$$\xi_{(1,3)3} = \frac{2g(p_1 - p_3)\upsilon + K\left(G_1^2 - G_3^2\right) - 2g(z_3 - z_1)}{\upsilon^2 G_3^2} \qquad (12)$$

Mengingat $G2 = G3$, $M = G.A$, $m = A2/A1 = \square$, $M1 = M3$, $Cd = \mu$

dan menurut Ward Smith, A.J. , hal 158 , maka

$$2(p_1 - p_3)g = \frac{V_2^2(1-m^2)\rho}{C_d^2}$$

sehingga

$$\xi_{(1.3)3} = \frac{(p_1 - p_3)2g}{\upsilon G_3^2} + \frac{K}{\upsilon^2}\left[\left(\frac{G_1}{G_3}\right)^2 - \left(\frac{G_{2r}}{G_3}\right)^2\right] - \frac{2g(z_3 - z_1)}{\upsilon^2 G_3^2}$$

$$= \frac{V_2^2(1-m^2)\rho}{\upsilon G_3^2 \mu^2} + \frac{K}{\upsilon^2}\left[\left(\frac{M_1}{A_1}\right)^2\left(\frac{A_3}{M_3}\right)^2 - 1\right] - \frac{2g(z_3 - z_1)}{\upsilon^2 G_3^2}$$

Karena $M1 = M3$

$$= \frac{1}{\mu^2 \upsilon^2}(1-m^2)\varepsilon^2\left(\frac{Q_2}{M_3}\right)^2 + \frac{K}{\upsilon^2}(\varepsilon^2 m^2 - 1) - \frac{2g(z_3 - z_1)}{\upsilon^2 G_3^2}$$

$$\left(\frac{Q_2}{M_3}\right)^2 \infty K = \frac{\upsilon_g^2 x^3}{\alpha^2} + \frac{\upsilon_l^2(1-x)^3}{(1-\alpha)^2}$$

$$\xi_{(1.3)3} = \frac{1}{\mu^2 \upsilon^2}(1-m^2)\varepsilon^2 K + \frac{K}{\upsilon^2}(\varepsilon^2 m^2 - 1) - \frac{2g(z_3 - z_1)}{\upsilon^2 G_3^2} \qquad (13)$$

Untuk mendapatkan koefisien tahanan lokal untuk ekspansi yang tidak terkontrol, maka persamaan 10 diintegralkan kembali dari 3 sampai 4 , dan kemudian digabungkan dengan persamaan 4 , sehingga didapatkan

$$(p_3 - p_4)\upsilon + \frac{K}{2g}(G_3^2 - G_4^2) + (z_3 - z_4) = \xi_{(3.4)3}\frac{\upsilon^2 G_3^2}{2g} \qquad (14)$$

Kemudian diambil persamaan momentum untuk aliran dua fase model aliran terpisah sebagai berikut (Graham B. Wallis, 1969)

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau_w}{D} + G\frac{d}{dz}\left[xV_g + (1-x)V_l\right] + \left[\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l\right]\cos\theta \qquad (15)$$

Untuk aliran satu dimensi , stedi, tanpa gesekan dan untuk saluran horisontal persamaan diatas dapat dituliskan sebagai berikut

$$-\frac{dp}{dz} = G^2 \frac{d}{dz}\left[\frac{x^2}{\rho_g \alpha} + \frac{(1-x)^2}{\rho_l (1-x)}\right] + \left[\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l\right]$$

Dengan menyamakan satuan antara ruas kiri dan kanan persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk :

$$-dpA = G^2 Ad\left[\frac{x^2}{\rho_g \alpha} + \frac{(1-x)^2}{\rho_l (1-x)}\right] + A\left[\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l\right]dz \qquad (16)$$

Persamaan 16 diintegralkan dari 3□4 sehingga didapatkan :

$$(p_3 - p_4) = \frac{H}{A_4 g}\left(G_4^2 A_4 - G_3^2 A_3\right) + \left(A_4 z_4 - A_3 z_3\right)\frac{N}{A_4} \qquad (17)$$

Dimana

$$H = \frac{x^2}{\rho_g \alpha} + \frac{(1-x)^2}{\rho_l (1-\alpha)} \qquad\qquad N = \alpha\,\rho_g + (1-\alpha)\rho_l$$

Persamaan 17 digabungkan dengan persamaan 14 menjadi

$$\frac{\upsilon H}{g A_4}\left(G_4^2 A_4 - G_3^2 A_3\right) + \frac{N\upsilon}{A_4}\left(A_4 z_4 - A_3 z_3\right) + \frac{K}{2g}\left(G_3^2 - G_4^2\right) + \left(z_4 - z_3\right) = \xi_{(3,4)3}\frac{G_3^2 \upsilon^2}{2g}$$

$$\xi_{(3,4)3} = \frac{2H}{\upsilon}\left[\left(\frac{M_4}{A_4}\right)^2\left(\frac{A_3}{M_3}\right)^2 - \varepsilon m\right] + \frac{N2g}{G_3^2\upsilon}\left(z_4 - \varepsilon m z_3\right) + \frac{K}{\upsilon^2}\left[1 - \left(\frac{M_4}{A_4}\right)^2\left(\frac{A_3}{M_3}\right)^2\right] + \frac{2g(z_4 - z_3)}{G_3^2\upsilon^2}$$

Karena $M_4 = M_3$, $A_1 = A_4$

$$\xi_{(3,4)3} = \frac{2H}{\upsilon}\left(\frac{G_4^2}{G_3^2} - \frac{A_3}{A_4}\right) + \frac{N2g}{G_3^2\upsilon}\left(\frac{z_4}{1} - \frac{A_3}{1}\frac{z_3}{G_3^2}\right) + \frac{K}{\upsilon^2}\left(1 - \frac{G_4^2}{G_3^2}\right) + \frac{2g(z_4 - z_3)}{G_3^2\upsilon^2}$$

$$\xi_{(3,4)3} = \frac{2\varepsilon m H}{\upsilon}\left(\varepsilon m - 1\right) + \frac{2g}{\upsilon}\left[z_4\left(N + \frac{A_4}{\upsilon}\right) - z_3\left(\varepsilon m N + \frac{1}{\upsilon}\right)\right] + \frac{K}{\upsilon^2}\left(1 - \varepsilon^2 m^2\right)$$

$$\xi_{(3,4)3} = \frac{2\varepsilon m H}{\upsilon}(\varepsilon m - 1) + \frac{2g}{G_3^2\upsilon}\left[z_4(N + \rho) - z_3(\varepsilon m N + \rho)\right] + \frac{K}{\upsilon^2}\left(1 - \varepsilon^2 m^2\right) \rightarrow (18)$$

Persamaan 13 dan 18 masuk ke persamaan 7 maka koefisien tahanan lokal orifice menjadi

$$\xi_{(1,4)2} = \left[\xi_{(1,3)3} + \xi_{(3,4)3}\right]\left(\frac{A_2}{A_3}\right)^2$$

$$= \left\{ \frac{\varepsilon^2 K}{\mu^2 \upsilon^2}\left(1-m^2\right) + \frac{K}{\upsilon^2}\left(\varepsilon^2 m^2 - 1\right) - \frac{(z_3 - z_1)2g}{\upsilon^2 G_3^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{2\varepsilon m H}{\upsilon}(\varepsilon m - 1) + \frac{K}{\upsilon^2}\left(1-\varepsilon^2 m^2\right) + \frac{2g}{G_3^2 \upsilon}\left[z_4(\rho + N) - z_3 N(\varepsilon m + 1)\right] \right\}\left(\frac{A_2}{A_3}\right)^2$$

$$= \left\{ \frac{2\varepsilon m H}{\upsilon}(\varepsilon m - 1) + \frac{\varepsilon^2 K}{\mu^2 \upsilon^2}\left(1-m^2\right) + \frac{2g}{\upsilon G_3^2}\left[z_4(N+\rho) - z_3 N(\varepsilon m + 1) - \frac{z_3}{\upsilon} + \frac{z_1}{\upsilon}\right]\right\}\left(\frac{1}{\varepsilon^2}\right)$$

$$= \left\{ \frac{2\varepsilon m H}{\upsilon}(\varepsilon m - 1) + \frac{\varepsilon^2 K}{\mu^2 \upsilon^2}\left(1-m^2\right) + \frac{2g}{\upsilon G_3^2}\left[z_4(N+\rho) + \frac{z_1}{\upsilon} - z_3\left\{N(\varepsilon m + 1) + \frac{1}{\upsilon}\right\}\right]\right\}\left(\frac{1}{\varepsilon^2}\right)$$

$$\xi_{(1.4)2} = \frac{2mH}{\varepsilon\upsilon}(\varepsilon m - 1) + \frac{K}{\mu^2\upsilon^2}\left(1-m^2\right) + \frac{2g}{\varepsilon^2 \upsilon G_3^2}\left\{ z_4(N+\rho) + \frac{z_1}{\upsilon} - z_3\left[N(\varepsilon m + 1) + \frac{1}{\upsilon}\right]\right\} \quad (19)$$

Karena massa jenis ρ untuk fluida dua fase yang mempunyai kehampaan α maka harga ρ = N ehingga untuk kondisi yang ideal G3 = G2 maka suku ke tiga ruas kanan menjadi

$$\frac{2g}{\upsilon G_3^2} = \frac{2g}{\upsilon G_2^2} = \frac{\varepsilon^2 K\left(1-m^2\right)}{\upsilon^2 \mu^2 (p_1 - p_4)}$$

$$\frac{2g}{\varepsilon^2 \upsilon G_2^2} = \frac{K\left(1-m^2\right)}{\upsilon^2 \mu^2 (p_1 - p_4)}$$

Sehingga rumus 19 menjadi

$$\xi_{(1,4)2} = \frac{K\left(1-m^2\right)}{\upsilon^2\mu^2} + \frac{2Hm(\varepsilon m - 1)}{\varepsilon\upsilon} + \frac{K\left(1-m^2\right)}{\upsilon^2\mu^2(p_1 - p_4)}\left\{z_4(\rho+\rho) - z_3\left[\rho(\varepsilon m + 1) + \rho\right] + z_1\rho\right\}$$

$$\xi_{(1,4)2} = \frac{2mH}{\varepsilon\upsilon}(\varepsilon m - 1) + \frac{K}{\mu^2\upsilon^2}\left(1-m^2\right) + \frac{K\left(1-m^2\right)}{\upsilon^2\mu^2\Delta p}\left\{\rho\left[2z_4 + z_1 - z_3(\varepsilon m + 2)\right]\right\} \quad (20)$$

Bila menggunakan saluran horisontal maka suku ke tiga dari rumus 20 bisa diabaikan sehingga rumusnya menjadi

$$\xi_{(1,4)2} = \frac{K\left(1-m^2\right)}{\upsilon^2\mu^2} + \frac{2Hm(\varepsilon m - 1)}{\varepsilon\upsilon} \quad (21)$$

IV. KESIMPULAN

Dari rumus di atas dapat disimpulkan bahwa koeffisien tahanan lokal tergantung pada tekanan (p), kualitas (x), fraksi kehampaan (α), perbandingan penampang orifice dengan penampang saluran (m) dan posisi (Z).

Daftar Notasi

A	Luas penampang saluran, m^2
C_f	Koefisien gesekan
C_d	Koefisien discharge
D	Diameter , m
d	Diameter lubang orifice , m
dp/dz	Gradien tekanan, N/m^3
dq_e/dz	Perubahan kecepatan perpindahan panas sepanjang saluran
dw/dz	Perubahan kerja sepanjang saluran
G	Fluks massa, kg/m^2s
g	Gravitasi , m/s^2
h	Entalpi
M	Kecepatan massa, kg/s
m	Perbandingan luas lubang orifice dengan lubang saluran
n	Indeks
p	Tekanan , Pascal
R	Koefisien kerugian tekanan
s	Perbandingan kecepatan
V_g	Kecepatan fraksi gas , m/s
V_l	Kecepatan fraksi cair, m/s
W	Kecepatan aliran massa, kg/detik
x	Kualitas
z	Titik elevasi
Huruf Yunani	
α	Fraksi hampa
ε	Koefisien kontraksi
ϕ^2	Pengali dua fase
μ	Viskositas , Ns/m^2
θ	Sudut kemiringan
ρ	Massa jenis, kg/m^3
τ	Tegangan geser dinding, N/m^2
$\xi_{1.2}$	Koefisien tahanan lokal antara titik 1 dan titik 2
υ	Volume spesifik , m^3/kg
σ	Tegangan permukaan, N/m

Subskrip	
1	Titik stedi dibagian hulu orifice
2	Titik tepat pada orifice
3	Titik pada vena kontrakta
4	Titik stedi dibagian hilir orifice
g	Phase gas
l	Phase cair
r	Kondisi ideal
w	Dinding
Superskrip	
-	Rerata antara 1 dan 4

DAFTAR PUSTAKA

Bentley, John P., 1983," Principles of Measurement Systems" , Second Edition, Longman Scientific & Technical, John Wiley & Sons, Inc.New York.

Chen, D.K. et all, 1986, "The Local Resistance of Gas-Liquid Two Phase Flow Through an Orifice", International Journal Heat and Fluid Flow.

Gad Hetsroni, 1982," Handbook of Multiphase System ", Mc Graw Hill Company, New York.

Graham B Wallis , 1969 "One Dimentional Two Phase Flow" , Mc Graw Hill Company, New York.

Koestoer, Raldi Artono dan Sasanti Proborini, 1994, " Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis" , PT Pradnya Paramita, Jakarta, cetakan I.

Lipschutz,S.,Poe, A.,1982,"Theory and Problems of Programming with Fortran ", Mc Graw –Hill International Book Company, Singapore.